

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Хатунцевой Ольги Николаевны
на диссертационную работу Березко Максима Эдуардовича
«Физико-математические модели пристеночных течений расширенном
кнудсеновском слое», представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9 - «Механика жидкостей, газа и плазмы»

Не только новые фундаментальные разделы науки приводят к техническому прогрессу. Существует и обратная связь, когда развитие техники способствует зарождению и развитию новых направлений в науке.

В диссертации Березко Максима Эдуардовича ярко прослеживается именно этот аспект. А именно, показано, что развитие гиперзвуковой техники заставляет искать новые подходы к решению задач описания высоконеравновесных газодинамических течений. Этим определяется безусловная **актуальность** работы.

В работе рассматриваются различные аспекты моделирования газодинамических течений вблизи поверхностей, когда необходимо учитывать области течения с различными характерными масштабами значений чисел Кнудсена. В настоящее время, к сожалению, не существует единого подхода к моделированию течения газа и жидкости, начиная от масштабов свободномолекулярного движения молекул и заканчивая течением сплошной среды. Нет и единого подхода, позволяющего в разумное время считать обтекание газа вблизи тела с произвольной геометрией для широкого диапазона значений числа Кнудсена. Поэтому приходится прибегать к моделированию отдельных областей, характеризующихся различными значениями числа Кнудсена, разными подходами, а затем производить «сшивание» между этими областями.

В областях «сшивания» отсутствует равновесность статистического распределения молекул газа. Высокая степень неравновесности присуща и течению газа в пристеночных областях, где происходит взаимодействие отдельных молекул газа с поверхностью обтекаемого тела. Кроме того, основные параметры гидродинамического течения: плотность, скорость течения,

Отдел документационного
обеспечения МАИ

*06.12.2022

температура, давление являются моментами функции распределения, определяемые кинетической моделью, однако, зная их восстановить функцию распределения в неравновесном газе невозможно. Этим определяются основные трудности при разработке эффективных подходов к моделированию разномасштабного (по числам Кнудсена) течения газа.

В работе Березко М.Э. разрабатываются эффективные методы «сшивания» кинетической модели многоатомных газов и гидродинамической (Навье-Стокса-Фурье) модели, а также исследуются вычислительные аспекты использования этих методов для моделирования процесса обтекания газом поверхностей, в которых происходит переход от геометрии с большой кривизной к плоской геометрии. В области «сшивания» моделей восстанавливается аппроксимирующая функция распределения в виде разложение локально-равновесной функции Максвелла по степеням тепловой скорости, причем «сшивания» моделей происходит в слабонеравновесной области течения. Такой подход позволяет моделировать сложные аэродинамические процессы в широком интервале чисел Маха и Кнудсена с приемлемой точностью. В этом состоит **научная новизна и теоретическая значимость работы.**

Работа состоит из Введения, трех глав и заключения.

Во Введении приведен обзор работ по методам описания неравновесных течений газа вблизи поверхности и/или острой кромки на основе метода декомпозиции области течения, рассмотрения кинетических и гидродинамических методов описания течения в различных подобластях и последующего «сшивания» полученных решений в этих подобластях.

Первая глава посвящена разработке эффективных методов «сшивания» моментных (гидродинамических) и кинетических уравнений.

За счет выбора расположения области «сшивания» моделей в слабонеравновесной области течения (на расстоянии порядка нескольких длин свободного пробега молекул от обтекаемой поверхности), появляется возможность передачи информации от модели Навье-Стокса-Фурье (НСФ) к кинетической модели посредством навье-стоксовской функции распределения,

поскольку в этом случае модель течения газа и аппроксимирующая функция распределения имеют одинаковый порядок приближения.

Для выполнения численных экспериментов, в качестве тестовой задачи выбрано течение Куэтта. Рассматривается течение многоатомного газа с учетом вращательных степеней свободы, а также зеркального и диффузного характера отражения молекул от поверхности. Различные комбинации чисел Маха M и чисел Кнудсена Kn позволяют изучать течения различной степени неравновесности.

Во **второй главе** рассматривается выбор граничных условий для течений с высокой степенью неравновесности. В качестве тестовой задачи выбрано плоское течение Куэтта, а для величины сравнения – относительный коэффициент трения.

Для гидродинамической модели НСФ выбирались граничные условия прилипания и скольжения пограничного слоя. Для кинетической модели – диффузный закон отражения молекул от твёрдой стенки.

Сделаны выводы, что граничные условия прилипания могут быть использованы при $Kn < 0.1$, граничные условия скольжения пограничного слоя применимы для сверхзвуковых течений до $Kn < 1$ и для гиперзвуковых течений до $Kn < 0.1$, в остальных областях, определяемых числами Маха и Кнудсена, целесообразно использовать комбинированные кинетико-гидродинамические модели.

Третья глава посвящена расчёту гиперзвукового течения в окрестности поверхности большой кривизны. Численно исследуется гиперзвуковое обтекание бесконечно острой кромки с нулевым углом атаки. Рассматривается течение в окрестности особой точки (точке разделения молекулярных потоков на два потока, принадлежащих разным статистикам) с позиций молекулярно-кинетической теории газов. Численно решаются кинетические уравнения релаксационного типа с учетом функции распределения молекул по вращательным энергиям.

Практическая значимость работы заключается в разработке вычислительных подходов, ориентированных на расчеты высокоскоростных и

разреженных течений газа, которые могут быть использованы на этапе проектирования аэро- космической техники. Об этом, в частности, свидетельствует то, что представленные результаты были использованы в комплексной исследовательской работе в области неравновесной газовой динамики, проводимой на кафедре «Аэродинамика ЛА» МАИ в рамках государственного задания Минобрнауки России (номер темы FSFF-2020-0013).

По теме диссертации опубликованы 4 статьи в журналах из списка, одобренного ВАК. Работа прошла серьезную апробацию – докладывалась на конференциях, в том числе и международных.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Вместе с тем по работе можно сделать некоторые замечания:

1. в формуле (2) на стр. 22 не расшифрованы обозначения u^* и x^* ;
2. на стр.28 гл. 1.3 в выражении для производной вдоль продольной оси корректнее было бы записать обозначения параметров течения, рассматриваемые в задаче;
3. на стр. 30 выражение (13) задает безразмерное выражение для плотности, однако, в тексте об этом не сказано – употребляется термин «скорректированное значение плотности», хотя перед этим не использовались безразмерные параметры;
4. на стр. 32 не обоснован выбор выражения для условия скольжения пограничного слоя;
5. было бы полезно в качестве результатов решения задачи Куэтта привести не только профили температур, но и профили скорости;
6. не приведена погрешность расчета при переходе от точки к конечному размеру области расширенного кнудсеновского слоя в критической точке при обтекании бесконечной тонкой пластины. В результате трудно оценить насколько эффективно применение разработанного метода.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работа, их можно, скорее всего, рассматривать как пожелания для дальнейшей работы.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям ВАК, в том числе, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Березко Максим Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - «Механика жидкостей, газа и плазмы»

Доктор физико-математических наук,
Ученый секретарь ПАО «РКК «Энергия»



Хатунцева Ольга Николаевна

1.12.2022

Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»)

Почтовый адрес: ул. Ленина, 4а, г. Королёв, Московская обл., Россия, 141070.

Телефон: +7 (495) 513-75-89.

Адрес электронной почты: почты: olga.khatuntseva@rsce.ru

С отзывом ознакомлен
6.12.2022